

踏み込みによる入力がVR空間での階段昇段感に与える影響の分析

廣末 裕太^{*1} 片岡 佑太^{*2} 柴田 史久^{*1} 木村 朝子^{*1}

Evaluation of the Effects of Stomp Input on the Sensation of Ascending Stairs in Virtual Reality

Yuta Hirotsue^{*1}, Yuta Kataoka^{*2}, Fumihisa Shibata^{*1} and Asako Kimura^{*1}

Abstract – VR のロコモーションにおける階段昇降の入力インタフェースは、現実空間の制約を伴わない手段が望ましい。そこで本研究は、歩行や大きな体動を伴わない踏み込みによる入力手法が、階段昇段感に与える影響を複数の入力手法と共に比較した。具体的には、階段を足の踏み込みで昇段する Foot-Stomp Input (FSI)、足の挙上で昇段する Foot-Lift Input (FLI)、そしてコントローラで昇段する Controller-Button Input (CBI) の3手法を用いた。結果として、主観的作業負荷は CBI, FLI, FSI の順で有意に高くなった。一方、階段昇段感は CBI よりも FLI と FSI が有意に高く、かつ FLI と FSI 間に有意な差は見られなかった。この結果は、物理的な足の挙上がなくとも、踏み込みによる小さな体動のみで、実際の運動を伴う手法と同等の昇段感が生起される可能性を示唆した。

Keywords : Virtual Reality, Electromyography, Stair Locomotion

1. はじめに

廉価で高性能な HMD (Head-Mounted Display) の普及に伴い、VR (Virtual Reality) 技術はエンターテインメントや教育、リハビリテーション分野など多岐にわたる応用が進められている。特に、ユーザが仮想空間内を自由に移動するためのロコモーションインタフェースは、VR 体験の没入感を決定づける重要な要素であり、より自然で現実感のある移動感覚の実現を目指した研究が数多く行われてきた^[1]。

これまでの VR ロコモーションに関する研究の多くは、平坦な地面を移動する平面を主な対象としてきた。建物のフロア間を移動する階段の上り下りといった移動については、その多くはユーザが自身の足で実際に歩行するルームスケール移動^[2]を利用するものを前提としており、いくつかの課題が存在する。まず、ユーザの物理的な動作空間を設ける必要があり、広大な VR 空間を自由に探索するためには相応の現実空間が必要となる。さらに、視界を HMD に覆われた状態で歩行や階段昇降を行わせることは、転倒や衝突のリスクを常に伴う。

そこで本研究では、移動を伴わず階段昇段感を生起させるアプローチとして、その場での「足の踏み込み動作」による入力に着目した。足の踏み込み動作は、足を持ち上げる実際の歩行とは異なり、身体の大きな

上下動や前方移動を必要としない。このため、体験空間の制約を受けにくく、転倒などのリスクを回避できる。さらに、階段を「踏み込んで上る」という実世界の動作と関連が深いため、身体情報に基づいた直感的な操作を実現することが期待できる。

本研究の目的は、歩行や大きな動作を伴わない足の踏み込み動作による入力が VR 空間における階段昇段感に与える影響を、一般的な入力手法と共に分析する。具体的には、特性の異なる次の3つの入力手法 (1) コントローラのボタン操作で昇段する Controller-Button Input (CBI)、(2) トラッカーを用いて足を持ち上げる動作で昇段する Foot-Lift Input (FLI)、そして (3) 足の踏み込みで昇段する Foot-Stomp Input (FSI) を用い、それぞれを複数の階段昇段スピード条件で比較する。これにより、入力手法の違いが階段昇段感の生成にどのように寄与するのかを明らかにする。

本研究は、VR 空間において移動を伴わない複数の入力手法を比較することで、階段昇段インタフェース設計のための基礎的な知見を提供することを目指す。本研究の貢献は次の通りである。

- コントローラ入力による昇段・足の挙上による昇段・足の踏み込みによる昇段の比較を通じて、手法ごとの階段昇段感と主観的作業負荷を明らかにした。
- 足の踏み込みによる階段昇段は、足の挙上運動によって階段昇段させる手法と同等の階段昇段感を生起可能であることを明らかにした。

*1: 立命館大学大学院 情報理工学研究科

*2: 立命館大学 OIC 総合研究機構

*1: Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

*2: Open Innovation & Collaboration Research Organization, Ritsumeikan University

2. 関連研究

本章では、VR空間でのロコモーション手法および階段昇段手法の先行研究について述べ、本研究の新規性を明らかにする。

2.1 VR空間でのロコモーション手法

VR空間内での没入感を高める上で、ユーザが仮想世界を自由に移動するためのロコモーション技術は不可欠である。その代表的な手法であるルームスケール移動は、現実空間におけるユーザの歩行をVR空間に反映させることで高い臨場感を提供する^{[3][4]}。しかし、体験できる範囲が現実の物理空間に限定される制約を持つ。

この問題を解決するために、全方向に制限なく歩行が可能なトレッドミル^[5]も開発されているが、装置が大型で高価である。これらの課題から、多くのVRアプリケーションでは、コントローラを用いた移動が採用されている。しかし、身体的な運動感覚を伴わないため、臨場感の欠如やVR酔いの原因となることが指摘されている^{[6][7]}。

2.2 VR空間での階段昇降手法

階段の昇段は平面の2次元的な移動に加えて、上下の3次元的な移動も考慮する必要がある。その実現方法として、デバイスやユーザの身体動作を利用するもので、多様なアプローチが報告されている。

一般的に多くのVRコンテンツで用いられる入力法は、コントローラのアナログスティックを用いた手法である。このアプローチでは、ユーザがスティックを前方に倒して前進するだけであり、アプリケーションが階段の段差を識別してプレイヤーの視点を滑らかに持ち上げる。コントローラによる入力は、ユーザにとって簡便な入力手法である^[7]。

より身体性を高めるアプローチとして、ユーザの足の動きを直接入力に利用する研究がある。例えばKuritaらは、足首に装着したトラッカーでその場での足踏み動作を検知し、VR内の視点を操作することで階段昇降の運動イメージを誘発するシステムを開発した^[8]。

デバイスを実環境に設置することで階段昇段感を生起させることも可能である。長尾らは、ユーザの足元に接地した小さな突起による触覚フィードバックを視覚情報と統合して提示することで、単純な仕組みで昇段感覚を生み出せることを示した^[2]。ただし、ユーザがある程度歩き回れる物理的な空間と、そこに実環境へのデバイスの設置が必要となる。一方で、能動的に力や動きを提示し、階段昇段感を提示する事例も存在する。市販のステッパーを改造したLeらのRedirectedStepper^[9]は、ユーザがペダルを踏み込む際に、実

際の階段昇降時の抵抗力を足に加えて足踏みをユーザに行わせることで、その場に留まりながら坂道や階段を上る感覚を再現している。また、Impossible Staircase^[10]では、本物の階段を設置した大型昇降機を用い、ユーザの注意を逸らしている間に昇降機が下降し、無限に階段を上っているかのような錯覚を与えている。

このように、既存の階段昇段手法は多様なアプローチが取られているが、物理的な移動空間や大型デバイスが必要なケースが多く、体験空間が限られる場合には課題が残る。そこで本研究は、移動を伴わない複数の入力手法が階段昇段感の生成にどのように寄与するのかを比較分析する。具体的には、体動を伴う足上げ(FLI)、大きな体動を伴わない踏み込み(FSI)、そして従来のコントローラ入力(CBI)の3手法を比較し、階段昇段インタフェース設計のための基礎的知見を提供することを目指す。

3. 実験概要

3.1 入力手法

以下に示す3種類の入力手法を評価の対象とした。*Controller-Button Input (CBI)* ユーザがコントローラを両手でそれぞれ保持し、人差し指で左右のトリガーを交互に引くことで階段昇段を行った。

Foot-Lift Input (FLI) 足の挙上運動を直接捉えるため、両足の甲の部分にバンドでトラッカーを固定し、ユーザが各足を交互に一定以上の速度で上げることで階段昇段を行った。速度の閾値として、足上げによる足の上昇と、日常的な足の動きを区別する程度の速度を各参加者によって調整し、約0.8~1 [cm/fps]の範囲で設定した。

Foot-Stomp Input (FSI) 大きな体動を伴わない踏み込み動作を検知するため、両脚の大腿四頭筋の一つの外側広筋に筋電位計測装置を装着し、ユーザが床に足を接地して交互に足を踏み込むことで生じる脚部の筋電位信号(Electromyography; EMG)を計測し、取得された筋電位データの値が閾値を超えたときに階段昇段を行った。階段昇段時の若者の外側広筋の最大自発筋収縮(Maximum Voluntary Contraction, MVC)に対する割合が28% (±20%)であったことから、MVCの30%を閾値として設定した^[11]。

3.2 実験システム

3.2.1 システム構成

階段昇段を行うVR環境の構築には、Unity (2021.3.41f1)を使用した。HMDはHTC ViveのVIVE XR Eliteを用い、Wi-Fi経由でPCと接続する無線モードで通信を行った。コントローラは、VIVE Cosmos コントローラを使用した。トラッカーはVIVE Ultimate Trackerを採用し、VIVE ワイヤレ

スドングルによって PC と接続し、VIVE Hub 経由で SteamVR を使用してペアリングを行った。筋電位計測装置は ALTs 社の MyoScan 本体¹と測定用マイコン MyoScanBT+¹を用いた。参加者が装着するデバイスを図 1 (a) に示す。

MyoScan 本体でアナログ信号として取得された筋電位信号は、ローノイズ増幅回路によって 1500 倍に増幅された。この信号は MyoScanBT+ の内部で一連のフィルタリング処理が行われた。具体的には、信号に含まれる直流成分を除去し、絶対値を取る全波整流を行い、最後に移動平均による平滑化（ローパスフィルタ）が適用された。そして、この信号は量子化ビット数 8 [bit] でデジタル信号に変換された後、Bluetooth 通信を通じて PC へ約 70 [回/s] の頻度で送信された。

3.2.2 階段昇段アルゴリズム

階段昇段の視覚情報を提示するため、Seo らの Head and waist remapping^[12]を参考に、頭部の動きをリアルタイムで制御する階段昇段アルゴリズムを構築した。このアルゴリズムは、ユーザからの離散的な 1 歩分の入力を受け取るたびに、VR 空間内で階段昇段動作を反映する役割を担う。ユーザの視点（VR 空間内のカメラ）の移動を制御し、入力に応じてシグモイド関数を用いて滑らかに補正している。これにより、瞬間的な移動が行われることを避け、実際に体を持ち上げて一歩進んだかのような、自然な階段昇段を実現している。時刻 t での頭部の高さ $H_v^h(t)$ は、以下の式 (1) に従う。

$$H_v^h(t) = \begin{cases} H_v^h(t-1) + \Delta H_v^h(t), & \text{if } t - t_0 \geq T \\ H_v^h(t_0) + (H_r^h(t) - H_r^h(t_0)) \\ \quad + \frac{h_s}{1 + e^{-\frac{a}{T}(t-t_0-\delta)}}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 $H_v^h(t)$ は時刻 t における VR 空間内での頭部高さ、 $H_r^h(t)$ は時刻 t での現実空間での床からの頭部高さ、 t_0 はステップ動作の開始時刻、 h_s は階段 1 段の高さ、 T はステップ時間、 a はステップの滑らかさを制御する定数、 δ はシフトパラメータである。さらに、時刻 t での頭部の前進位置 $Z_h^v(t)$ は、以下の式 (2) に従う。実験では $a = 12$, $\delta = 0.3T$ を設定した^[12]。

$$Z_h^v(t) = \begin{cases} Z_h^v(t-1) + \Delta Z_h^v(t), & \text{if } t - t_0 \geq T \\ Z_h^v(t_0) + (Z_r^v(t) - Z_r^v(t_0)) \\ \quad + \frac{d_s}{1 + e^{-\frac{a}{T}(t-t_0-\delta)}}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 $Z_h^v(t)$ は t での VR 空間内の頭部の前進位置、 $Z_r^v(t)$ は t での現実空間での頭部の前進位置、 d_s は

階段の足を乗せる踏板の奥行き長さ、 b は滑らかさを制御する定数である。実験では $b = 12$ を設定した^[12]。

3.3 入力テンポ

階段を昇段するテンポは予備実験を実施して決定した。具体的には、男性参加者 8 人に対して「遅い」「普通」「速い」の感覚にあったテンポで実際の階段 7 段を昇段させ、そのときのテンポを記録した。その結果、それぞれの平均値が 64.4 (SD=1.2), 91.8 (SD=0.5), 120.1 (SD=0.5) [BPM] であったため、60, 90, 120 [BPM] のテンポを実験条件として採用した。

3.4 実験タスク

参加者は、椅子に座った状態で指定された入力手法とテンポで階段昇段を行い、VR 空間内の階段を 1 分間継続して上り続けた。各試行では、3 種類の入力手法 (FSI, FLI, CBI) と 3 種類の入力テンポ (60, 90, 120 [BPM]) の組み合わせからなる、計 9 条件のうちの 1 つがカウンターバランスを考慮して割り当てられた。

参加者には、メトロノームのリズムに合わせて、指定された条件で左右交互の入力を 1 分間行うよう指示した。加えて、タスク中は頭を動かさず、視線は常に正面を向くように指示した。1 回の入力に応じて、参加者の視点は階段を 1 段分（高さ 18 [cm], 前進 29 [cm]）上るように制御される。このとき、HMD に表示される映像は、参加者ごとに事前に計測した立位での目線の高さに調整されており、一人称視点で階段を上る映像が提示された。参加者が上る階段と、身長 170 [cm] の場合における参加者の視点を図 1 (b)(c) に示す。

4. 実験

4.1 実験デザイン

本実験では、前述した入力手法と入力テンポが、VR 空間における階段昇段時の階段昇段感覚に与える影響を調べる参加者内計画を採用した。独立変数は入力手法 (FSI, FLI, CBI) と入力テンポ (60, 90, 120 [BPM]) とした。従属変数には、VR 酔いの程度を測る Virtual Reality Sickness Questionnaire (VRSQ)^{[13][14]} のスコア、ユーザが感じた主観的な作業負荷を評価する NASA-RTLX^{[15][16]} のスコア、そして没入感やタスクの臨場感を評価する Witmer and Singer Questionnaire (WSQ)^[17] を改変した臨場感・階段昇段感評価のスコアとした。各スコアはアンケートによって収集された。

4.2 参加者

実験参加者は平均年齢 21.9 ($SD = 0.99$) 歳の男性 20 名であった。全参加者が HMD の使用経験を有しており、その週平均利用回数は 1.9 回、累計使用時間は平均 62 時間であった。

1: <https://alts-device.com/product/myoscan/>

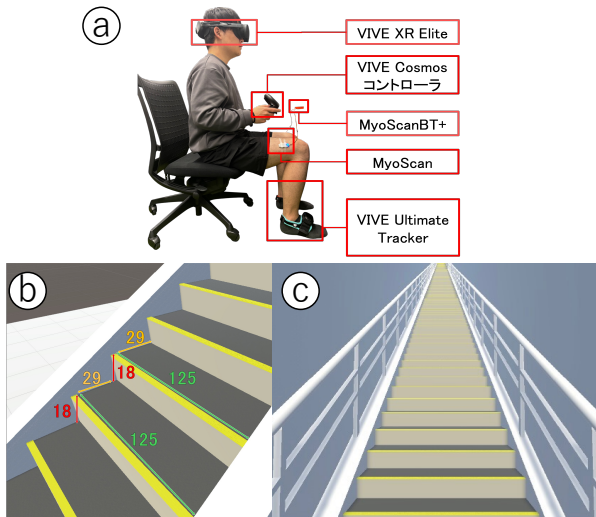


図 1: 実験のセットアップ：(a) 参加者の装着物，(b)VR 階段の寸法（蹴上：18 [cm]，踏面：29 [cm]，幅：125 [cm]），(c) 身長 170 [cm] の参加者における一人称視点

Fig. 1 Experimental setup: (a) equipment worn by the participant, (b) dimensions of the virtual staircase (riser: 18 cm, tread: 29 cm, width: 125 cm), and (c) first-person view for a participant who is 170 cm tall.

4.3 実験手順

実験は説明セッションから始められた。まず，参加者は実験について説明を受け，インフォームドコンセントに署名した。次に，参加者はトラッカーを両足の甲の部分にバンドで固定し，両脚の外側広筋（太もも前面にある大腿四頭筋の一つの筋肉）に筋電位センサを取り付け，HMD を装着した。

説明セッション後，MVC 測定のために，両脚での踏み込みを通じて最大自発筋収縮の計測が行われた。MVC 計測後は 9 条件（3 入力条件 × 3 テンポ）の中から，指定された条件で階段昇段タスクが行われた。条件の順番はカウンターバランスを考慮した上で設定された。タスク終了後，参加者には酔い，主観的作業負荷，臨場感・階段昇段感に関する質問に回答させた。酔いに関する質問では，VRSQ の 9 項目の質問に 4 段階のリッカート尺度（0：「なし」，1：「わずかに」，2：「中程度」，3：「激しく」）で回答させた。また，主観的作業負荷に関する質問では，NASA-RTLX の 6 項目（MD：知的・知覚的要求，PD：身体的要求，TD：タイムプレッシャー，OP：作業成績，EF：努力，FR：フラストレーション）に 20 段階で回答させた。臨場感・階段昇段感に関する質問では，WSQ を改変した 16 項目の質問（付録）には，7 段階のリッカート尺度（1：「全く当てはまらない」～7：「完全に当てはまる」）で回答させた。この手順を，疲労を避けるために十分

な休憩を挟みながら全 9 試行が評価されるまで繰り返した。

最後に実験参加者へのインタビューを行い，階段昇段感や好みの手法・テンポ，実験全体に関する感想を聴取した。VRSQ，NASA-RTLX，WSQ のスコアは，各 180 データ（20 人 × 9 条件）が収集された。実験に要した時間は 1 人あたり約 90 分であった。

4.4 実験結果

4.4.1 VR 酔い

各参加者の各試行において VRSQ の Total スコアは，10 点以下であったので，本実験はいずれの条件も，VR 酔いは問題にならなかったと考えられる。

4.4.2 主観的作業負荷

NASA-RTLX の各サブスケールと，全評価項目の平均値（RTLX）を各入力手法とテンポごとに算出したボックスプロットを図 2 に示す。実験データに正規性が認められなかったため，整列ランク変換^[18]を施したデータに対して，入力手法（CBI，FLI，FSI）× テンポ（60，90，120[BPM]）の 2 要因分散分析を行った。なお，交互作用は非有意であった。

入力手法 NASA-RTLX の 6 つの尺度全てにおいて，有意な主効果が確認された（知的・知覚的要求： $F(2, 152) = 17.67, p < .001$ ，身体的要求： $F(2, 152) = 118.23, p < .001$ ，タイムプレッシャー： $F(2, 152) = 14.92, p < .001$ ，作業成績： $F(2, 152) = 13.17, p < .001$ ，努力： $F(2, 152) = 84.42, p < .001$ ，フラストレーション： $F(2, 152) = 21.78, p < .001$ ）。主効果が有意なため，下位検定として，Tukey 法による事後比較を実施したところ，知的・知覚的要求，身体的要求，努力，フラストレーションの 4 項目においては，CBI の負荷が最も低く，FLI，FSI の順に，それぞれの手法間で有意に負荷が高くなることが示された。一方で，タイムプレッシャーと作業成績の項目では，CBI は他の 2 手法よりも有意に低い負荷であったが，FLI と FSI の間には有意な差は見られなかった（タイムプレッシャー： $p = .159$ ，作業成績： $p = .672$ ）。

入力テンポ 身体的要求（ $F(2, 152) = 3.92, p = .022$ ），タイムプレッシャー（ $F(2, 152) = 8.38, p < .001$ ），および努力（ $F(2, 152) = 4.35, p = .015$ ）の 3 項目で有意な主効果が見られ，その他の項目ではテンポによる有意な差は見られなかった（ $p > .05$ ）。入力テンポの主効果が有意であった各項目について Tukey 法による事後比較を行った。その結果，身体的要求と努力では 120 [BPM] が 60 [BPM] よりも有意に高い負荷を，タイムプレッシャーでは 120 [BPM] が 60 [BPM] および 90 [BPM] の両方よりも有意に高い負荷を与えることが示された（ $p < .05$ ）。

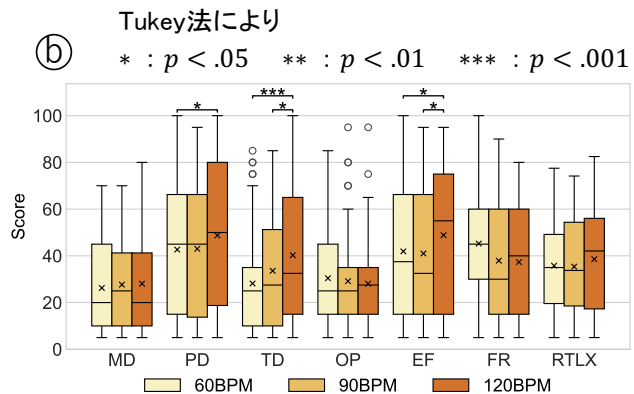
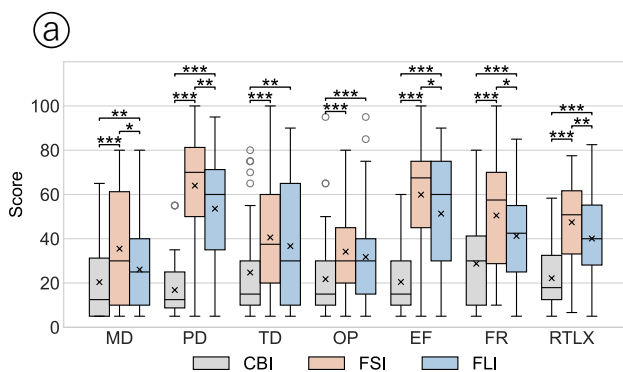


図 2: NASA-RTLX の結果：(a) 入力手法, (b) テンポ
Fig. 2 Results of NASA-RTLX: (a) Input method, (b) Tempo

4.4.3 階段昇段感・臨場感

16 項目の WSQ によって得られた、入力手法・テンポごとのスコアの平均値を図 3 に示す。実験データに正規性が認められなかったため、整列ランク変換を施したデータに対して、入力手法 (CBI, FLI, FSI) × テンポ (60, 90, 120 [BPM]) の 2 要因分散分析を行った。なお、交互作用は非有意であった。

入力手法 16 項目の質問のうち 11 項目で、入力手法の有意な主効果が確認された ($PQ1 : p < .001$, $PQ2 : p < .001$, $PQ3 : p < .001$, $PQ5 : p < .001$, $PQ7 : p < .001$, $PQ8 : p < .05$, $PQ10 : p < .001$, $PQ11 : p < .001$, $PQ12 : p < .05$, $PQ13 : p < .01$, $PQ15 : p < .05$)。主効果が有意な 11 項目に対して、下位検定として Tukey 法による事後比較を実施したところ、「あなたは階段の昇段をどの程度コントロールできましたか」($PQ1$)、「バーチャル環境での階段の昇段にどの程度早く慣れましたか」($PQ10$)、「体験の終了時に、どの程度習熟したように感じましたか」($PQ11$)といった、操作の習熟度やコントロールの容易さに関する項目においては、CBI が他の 2 手法よりも有意に高く評価された。例えば $PQ10$ では、CBI は FSI ($p < .001$) および FLI ($p < .001$) の両方に対して有意に高い評価を得ており、その一方で FSI と FLI の間では、FLI が FSI を上回る有意差が認められた ($p < .01$)。

その一方で、「バーチャル環境とのインタラクションはどの程度自然なように思えましたか」($PQ2$)、「動きを制御する方法はどの程度自然でしたか」($PQ3$)、「実世界での体験とどの程度似ていると感じましたか」($PQ5$)、そして「階段を上っている感覚はどの程度あなたにとって説得力のあるものでしたか」($PQ7$)といった臨場感や階段昇段感そのものを問う項目は、前述と逆の傾向が見られた。これらの項目では、FSI と FLI が、CBI よりも一貫して有意に高く評価された (全て

の比較で $p < .001$)。ただし、臨場感を問う項目では、FSI と FLI の間に統計的な有意差が見られなかった ($PQ2 : p = .999$, $PQ3 : p = .591$, $PQ5 : p = .397$, $PQ7 : p = .938$)。

入力テンポ 入力テンポにおける有意な主効果が「あなたの行動と期待される結果との間にどの程度の遅延があったように感じましたか」($PQ9 : F(2, 152) = 4.93, p = .008$) と、「階段の昇段にどの程度早く慣れましたか」($PQ10 : F(2, 152) = 4.22, p = .016$) の 2 項目で認められた。 $PQ9$ の遅延感については、60 [BPM] が 120 [BPM] よりも有意に高い評価となった ($p = .008$)。また、 $PQ10$ の慣れの早さに関しても、120 [BPM] が 60 [BPM] よりも有意に早く慣れることができることと評価された ($p = .019$)。その他の項目では、テンポの違いによる体験の質の変化は認められなかった。

5. 議論

CBI は主観的作業負荷が低いスコアが得られた一方で、階段昇段感のスコアは FSI, FLI と比べて低かった。対照的に、FSI と FLI は作業負荷が高いものの、自身の身体動作と視覚的な階段昇段が一致するため高い臨場感を生み出した。特に FSI では、「実際の階段を上った時の疲労感と似ていた」というコメントも得られ、筋活動が昇段感の向上に寄与することが示唆された。

本研究における興味深い知見として、FSI と FLI の二手法で同程度の高い階段昇段感が得られた点にある。物理的な足の挙上動作を伴う FLI と、足の挙上動作を行わない FSI の間に差が見られなかったことは、必ずしも大きな身体運動がなくとも、筋活動という内部的な身体情報のみで階段昇段の感覚を十分に生起できる可能性を示唆している。これは、身体を機械的に固定し、ユーザの運動意図のみで仮想身体を操作する Motion-Less VR と関連する。Mochizuki らは、

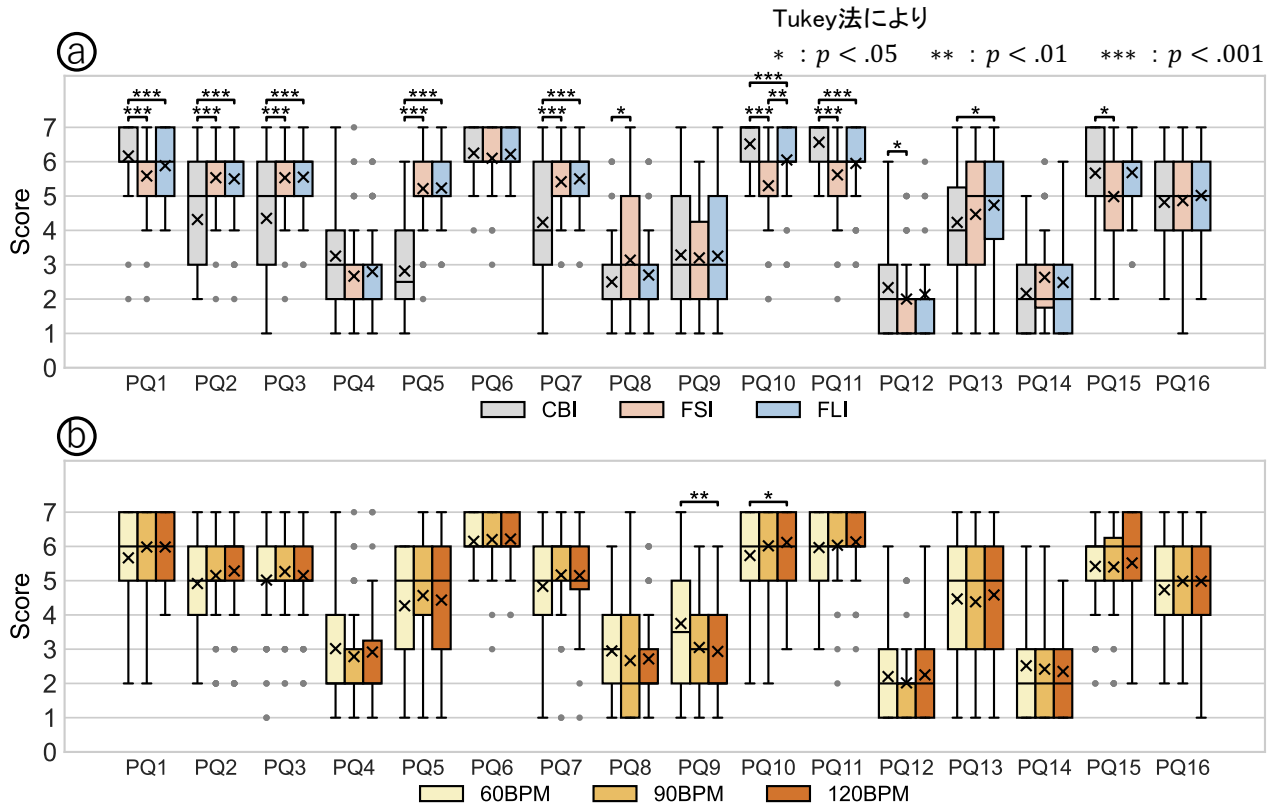


図 3: WSQ の結果 : (a) 入力手法, (b) テンポ
Fig. 3 Results of WSQ: (a) Input method, (b) Tempo

身体固定式のシステムと、実際に指を動かして操作する Leap Motion での入力を比較し、身体所有感や運動主体感といった主観評価において、両者に有意差が見られなかったと報告している^[19]。本研究においても同様に、足の挙上の有無に関わらず、ユーザーの運動意図が視覚的にフィードバックされることで、仮想空間内での階段昇段感が生じられたと考える。ただし、FSI はフラストレーションや知的要求のスコアが最も高く、慣れが必要であるという結果が見られた。この原因として、参加者の「入力操作が難しい」というコメントが得られており、大きな体動を伴わない筋収縮だけで力の入れ具合を制御することの難しさにあると考えられる。

6. まとめ

本研究は、VR 空間における移動を伴わない階段昇段インタフェースの実現を目指し、足の挙上を伴わない踏み込みによる入力が、VR 空間での階段昇段感に与える影響を分析した。実験では 3 つの階段昇段手法として、足の挙上を伴わない筋収縮の入力による FSI、足の挙上を伴う FLI、コントローラのボタン操作を行う CBI を設定した。また、3 つの階段昇段時の入力テンポを組み合わせた計 9 条件で、VR 酔い、主観的作業負荷、臨場感・階段昇段感を評価した。

実験を通して、(1) 作業負荷は CBI, FLI, FSI の順で有意に高くなること、(2) 臨場感や階段昇段感は CBI よりも身体動作を伴う 2 手法が有意に高いこと、(3) 筋収縮のみに依る FSI と物理的な動作である FLI の間で、階段昇段感の評価に有意な差が見られなかったこと、(4) FSI は入力の難しさから知的負荷やフラストレーションが最も高いこと、が明らかになった。今後の展望としては、階段の昇段だけではなく、降段時における階段降段感の比較を行う予定である。

参考文献

- [1] 野間, “ロコモーションとバーチャルリアリティ”, 計測と制御, vol. 43, no. 2, pp. 133–138, 2004.
- [2] R. Nagao, K. Matsumoto, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose, “Ascending and descending in virtual reality: Simple and safe system using passive haptics,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 24, no. 4, p. 1584–1593, Apr. 2018.
- [3] M. Slater, M. Usoh, and A. Steed, “Taking steps: the influence of a walking technique on presence in virtual reality,” *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, vol. 2, no. 3, p. 201–219, Sep. 1995.
- [4] P. Caserman, P. Achenbach, and S. Göbel, “Analysis of inverse kinematics solutions for full-body reconstruction in virtual reality,” in *2019 IEEE 7th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)*, 2019, pp. 1–8.

- [5] R. P. Darken, W. R. Cockayne, and D. Carmein, "The omni-directional treadmill: a locomotion device for virtual worlds," in *Proceedings of the 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, ser. UIST '97. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 1997, p. 213–221.
- [6] G. Llorach, A. Evans, and J. Blat, "Simulator sickness and presence using hmds: comparing use of a game controller and a position estimation system," in *Proceedings of the 20th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, ser. VRST '14. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2014, p. 137–140.
- [7] C. Boletsis, J. E. Cedergren, and M. Porta, "Vr locomotion in the new era of virtual reality: An empirical comparison of prevalent techniques," *Adv. in Hum.-Comp. Int.*, vol. 2019, Jan. 2019.
- [8] Y. Kurita, T. Okumura, R. Imai, T. Nishigami, S. Tanaka, and T. Taniguchi, "Stair-climbing training system using visual vr display for total knee arthroplasty patients," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 35, no. 3, pp. 612–621, 2023.
- [9] Q.-T. Le, D.-N. Huynh, T. Q. Tran, M. Fjeld, W. Stuerzlinger, M. Zank, M.-T. Tran, and K.-D. Le, "Redirectedstepper: Exploring walking-in-place locomotion in vr using a mini stepper for ascents," in *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ser. CHI '25. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2025.
- [10] J.-H. Cheng, Y. Chen, T.-Y. Chang, H.-E. Lin, P.-Y. C. Wang, and L.-P. Cheng, "Impossible staircase: Vertically real walking in an infinite virtual tower," in *2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 2021, pp. 50–56.
- [11] T. Hortobagyi, C. Mizelle, and P. DeVita, "Old adults perform activities of daily living near their maximal capabilities," *The journals of gerontology. Series A, Biological sciences and medical sciences*, vol. 58, pp. M453–60, 05 2003.
- [12] M. Seo and H. Kang, "Toward virtual stair walking," *Vis. Comput.*, vol. 37, no. 9–11, p. 2783–2795, Sep. 2021.
- [13] H. K. Kim, P. Jaehyun, C. Yeongcheol, and C. Mungyeong, "Virtual reality sickness questionnaire (vrsq): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment," *Applied Ergonomics*, vol. 69, pp. 66–73, 05 2018.
- [14] 氏家, "映像酔い", 映像情報メディア学会誌, vol. 61, no. 8, pp. 1122–1124, 2007.
- [15] S. G. Hart and L. E. Staveland, "Development of nasa-tlx (task load index): Results of empirical and theoretical research," in *Human Mental Workload*, ser. Advances in Psychology, P. A. Hancock and N. Meshkati, Eds. North-Holland, 1988, vol. 52, pp. 139–183.
- [16] 芳賀, 水上, "日本語版NASA-TLXによるメンタルワークロード測定 各種室内実験課題の困難度に対するワークロード得点の感度", 人間工学, vol. 32, no. 2, pp. 71–79, 1996.
- [17] B. G. Witmer and M. J. Singer, "Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 7, no. 3, pp. 225–240, 06 1998.
- [18] J. Wobbrock, L. Findlater, D. Gergle, and J. Higgins, "The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures," vol. 2011, 05 2011, pp. 143–146.
- [19] 望月, 中村, "リアル身体での運動を伴わない身体没入型vrインタフェース「motion-less vr」の提案と基礎検討", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 26, no. 1, pp. 76–85, 2021.

付録

表: 階段昇段感・臨場感に関する質問項目

PQ1	あなたは階段の昇段をどの程度コントロールできましたか
PQ2	バーチャル環境とのインタラクションはどの程度自然なように思えましたか
PQ3	バーチャル環境の中で動き（階段昇段）を制御する方法はどの程度自然でしたか
PQ4	視覚・運動感覚などの多様な感覚から受け取っている情報はどの程度一貫性がなかったり、関連がないように感じましたか
PQ5	バーチャル環境での階段を上る体験は、実世界での体験とどの程度似ていると感じましたか
PQ6	あなたが行った行動に対する反応として次に何が起きかを予測できましたか
PQ7	バーチャル環境の中で階段を上っている感覚はどの程度あなたにとって説得力のあるものでしたか
PQ8	バーチャル環境とのインタラクションに用いる階段の昇段手法はどれくらい気が散るものでしたか
PQ9	あなたの行動と期待される結果との間にどの程度の遅延があったように感じましたか
PQ10	バーチャル環境での階段の昇段にどの程度早く慣れましたか
PQ11	体験の終了時に、バーチャル環境での階段の昇段にどの程度習熟したように感じましたか
PQ12	HMD の映像面での品質は課したタスクやそれに必要な活動を行うのにどの程度妨げになったり気が散ったりしましたか
PQ13	バーチャル環境の視覚的な面が没入感にどの程度影響していましたか
PQ14	デバイスは課したタスクやほかの活動の遂行をどの程度妨げましたか
PQ15	操作方法を気にすることなく、階段を上ることにどの程度集中することができましたか
PQ16	時間感覚を忘れてしまうほどバーチャル環境での体験にどの程度没頭していましたか